Aus der Universitäts-Augenklinik
Direktor: Professor Dr. H. Harms

Über die Bedeutung von Pupillenweite und Umfeldleuchtdichte bei der Prüfung des Adaptationsvermögens

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
ERNST MARTIN MEYNER
aus Altenburg

1962

7138

Aus der Universitäts-Augenklinik
Direktor: Professor Dr. H. Harms

Über die Bedeutung von Pupillenweite und Umfeldleuchtdichte bei der Prüfung des Adaptationsvermögens

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
ERNST MARTIN MEYNER
aus Altenburg

1962

8901/62

Dekan: Professor Dr. Brecht

Berichterstatter: Professor Dr. H. Harms

Fotodruck PRÄZIS · Tübingen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	1
Untersuchungsprogramm	5
Methodik	6
Zur Terminologie und Darstellungsweise	9
Versuchspersonen	11
Die Versuchsergebnisse	11
Besprechung der Ergebnisse	17
Zusammenfassung	29
Literatur	31

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549607_0068

Über die Bedeutung von Pupillenweite und Umfeldleuchtdichte bei der Prüfung des Adaptationsvermögens.

Einleitung

Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Methoden, mit denen Aufschluss über die Adaptationsfähigkeit des Auges gewonnen werden kann. Entweder prüft man nach Änderung einer gegebenen Umfeldleuchtdichte die dadurch verursachte Empfindlichkeitsänderung der Netzhaut in ihrem Zeitablauf, oder man bestimmt bei gleichbleibender Umfeldleuchtdichte nach beendetem Adaptationsvorgang die Empfindlichkeitsschwellen. Es ist von Interesse, die Untersuchungen für verschiedene Netzhautorte vorzunehmen, um auch die räumliche Empfindlichkeitsverteilung in der Netzhaut kennenzulernen.

Recht genau erforscht ist der Zeitablauf der Adaptation im völlig dunklen Umfeld nach vorhergehender intensiver Helladaptation. Meist wurde für die Versuche ein großflächiger Testreiz verwendet, der Netzhautbereiche verschiedener Empfindlichkeit und verschiedenen Adaptationsverhaltens einschließt. Diese Prüfung gestattet keine Schlüsse auf das Verhalten kleiner nach Lage und Funktion definierter Netzhautbereiche, weil in dem großen Testbereich jeweils der gerade empfindlichste Netzhautort die Reizantwort vermittelt. Diese Art der Untersuchung hat allerdings den Vorzug einer relativ einfachen und zuverlässigen Durchführung, weshalb die gebräuchlichen Adaptometer auf diese Methode eingestellt sind. Der Einfluss der vorausgehenden Helladaptation auf die Form der Normalkurven ist eingehend untersucht worden (HECHT, H.K.MÜLLER, WOLF u. ZIGLER u.a.). Nach genügend starker Vorbelichtung erhält man charakteristische Kurven, deren zwei Komponenten

durch den von KOHLRAUSCH beschriebenen Knick getrennt sind. Dieser Knick ist als Übergang von der Funktion des Tagesapparates zu der des Dämmerungsapparates anzusehen.

Werden statt der großen Testfläche kleinere Prüffelder verwendet, so können Adaptationskurven für einzelne Netzhautorte bestimmt werden. Es ergeben sich dann je nach Netzhautort unterschiedliche Adaptationskurven (HECHT, HAIG u. WALD, HECKMANN). In der Fovea ist die Adaptation wenig ausgiebig und rasch abgeschlossen, sie ist eine Leistung allein des Tagesapparates, da die Fovea innerhalb eines bestimmten Areals nur Zapfen enthält. In der Peripherie braucht die Anpassung längere Zeit, dafür übertrifft die Empfindlichkeitssteigerung diejenige des Netzhautzentrums um mehrere logarithmische Dekaden. Die Adaptationskurven exzentrischer Netzhautorte enthalten sowohl den raschen vom Tagesapparat geleisteten Anteil der Empfindlichkeitssteigerung als auch den später einsetzenden und mehr zögerten Anteil, der vom Dämmerungsapparat geleistet wird. Daher zeigen sie den schon erwähnten Knick. Die höchste Empfindlichkeit bei Dunkeladaptation wird an Orten zwischen 10 und 20 Grad Exzentrizität erreicht.

Außer dem Adaptationsablauf im völlig dunklen Umfeld wurde auch untersucht, wie die Empfindlichkeitsänderung vor sich geht, wenn die Umfeldbeleuchtung lediglich stark herabgesetzt wird (CRAWFORD, HATTWICK). Die Ergebnisse solcher Untersuchungen beantworten nicht nur eine Reihe von praktischen Fragen, wie sie das tägliche Leben stellt, sondern sie sind auch von grundsätzlichem Interesse für die Physiologie des Sehens.

Die zweite Untersuchungsmethode, die Lichtempfindlichkeit nach vollendetem Adaptationsvorgang bei gleichbleibender Umfeldleuchtdichte an verschiedenen Netzhautorten zu prüfen, ist von SLOAN eingeführt und von HARMS als klinisches

Verfahren weiterentwickelt und verfeinert worden (statische Perimetrie). Führt man diese Untersuchung bei verschiedenen gleichbleibenden Umfeldleuchtdichten aus, so erhält man Auskunft über die Empfindlichkeitsverteilung in der Netzhaut bei verschiedenen Adaptationszuständen.

Der Vergleich von Versuchsergebnissen, die unter verschiedenen Adaptationsbedingungen erzielt wurden, bereitet jedoch erhebliche Schwierigkeiten:

1.) Der Adaptationszustand ist abhängig von der Beleuchtungsstärke der Netzhaut. Diese wird außer der Umfeldleuchtdichte auch von der gegebenen Pupillenweite bestimmt. In den meisten Publikationen wird jedoch der Adaptationszustand allein durch die Umfeldleuchtdichte charakterisiert. Auch für die Schwellenleuchtdichte der Prüfmarke spielt die jeweilige Pupillenweite eine Rolle.

Man kann diesen veränderlichen Einfluß ausschließen, indem die Untersuchung bei konstanter Pupillenweite vorgenommen wird. Außerdem wurde mit Einführung der Einheit "Troland" der Versuch gemacht, ein Maß für die Netzhautbeleuchtungsstärke zu finden. Dabei wird eine einfache Proportionalität zwischen Pupillenfläche und Netzhautbeleuchtungsstärke vorausgesetzt. Diese Bedingung kann jedoch nicht mehr als voll zutreffend gelten. Es erwies sich nämlich, daß das Zentrum der Pupille "helligkeitswirksamer" ist als die Randgebiete (Effekt von STILES und CRAWFORD).

2.) Die Schwellenbestimmungen werden zumeist so vorgenommen, daß der Prüfreiz bei Dunkeladaptation in lichtloser Umgebung erscheint, man prüft die "absolute Schwelle". Ist jedoch das Umfeld durch eine noch so geringe Leuchtdichte aufgehellt, so wird bei Projektion die Prüfreizleuchtdichte dieser schon bestehenden Leuchtdichte hinzugefügt, bei anderen Darbietungsweisen ist sie von ihr umgeben. Man prüft

in beiden Fällen die "Unterschiedsschwelle". Die Umfeldleuchtdichte erzeugt also nicht nur den Empfindlichkeitszustand der Netzhaut (Adaptationsleuchtdichte), sondern sie geht überdies direkt in das Meßergebnis mit ein, indem sie den erkennbaren Leuchtdichteunterschied mitbestimmt. Das muß berücksichtigt werden, wenn die Empfindlichkeitsverhältnisse bei verschiedenen Adaptationszuständen miteinander verglichen werden sollen.

Das Ziel dieser Arbeit soll sein, unter solchen Überlegungen die Kenntnisse über das Adaptationsverhalten des Auges zu erweitern und den Einfluß der eben skizzierten Faktoren zu bestimmen. Erst wenn alle bei der Adaptationsprüfung wirksamen Faktoren genau bekannt sein werden, wird man Änderungen von Versuchsergebnissen einwandfrei auf Empfindlichkeitsänderungen in der Netzhaut beziehen können.

Untersuchungsprogramm

Eine erste Versuchsgruppe befaßte sich mit dem Zeitablauf von Dunkel- und Helladaptation. Es wurden zwei Netzhautorte geprüft, die sich in ihrer Funktion sehr unterscheiden: 0^{o} und 12^{o} (nasal). Außer der extremen Situation, die vorliegt, wenn nach Adaptation auf ein sehr helles Umfeld dieses völlig verdunkelt wird, wurde auch die Adaptation auf mittlere Leuchtdichten in das Versuchsprogramm aufgenommen.

In der zweiten Versuchsgruppe wurden Schwellenleuchtdichten nach beendetem Adaptationsvorgang bei 9 verschiedenen Adaptationszuständen ermittelt, und zwar für 8 Netzhautorte.

Die Versuche beider Gruppen wurden zunächst bei unbeeinflußter Pupille vorgenommen und die Schwellenwerte in der üblichen Prüfweise der Unterschiedsschwelle bestimmt. Zusätzliche Versuche sollten aufzeigen, wie groß der Einfluß der Pupillenweite ist und in welchem Maß die jeweils herrschende Umfeldleuchtdichte in das Meßergebnis direkt eingeht.

Methodik

Alle Versuche wurden am "Tübinger Perimeter" durchgeführt. Dies Gerät ist ein Halbkugel-Projektionsperimeter, das auch als Adaptometer verwendet werden kann. Die Beleuchtung der Halbkugel erfolgt nach dem Prinzip der Ulbrichtkugel, so daß die Umfeldleuchtdichte im ganzen Gesichtsfeld homogen ist. Die Umfeldleuchtdichte kann zwischen 10^{-7} und 10 asb in logarithmischen Stufen (log 0,1 einer Dekade) geändert werden. Dazu dienen Graufilterkombinationen entsprechender Abstufung. Außerdem können durch eine Zusatzbeleuchtung Umfeldleuchtdichten von 100, 1000 und 6000 asb hergestellt werden.

Ein Fixierpunktprojektor entwirft im Zentrum der Perimeterkugel vier rote oder weiße Punkte, die wie die Ecken eines auf der Spitze stehenden Quadrates angeordnet sind; der Abstand der gegenüberliegenden Punkte beträgt 2 Grad. Ihre Leuchtdichte kann so geändert werden, daß sie bei jedem Adaptationszustand eben sichtbar sind. Die Versuchsperson hat die Aufgabe, die Mitte zwischen diesen vier Punkten zu fixieren. Setzt man die Prüfmarke auf diesen Ort, so kann die Funktion der Fovea einwandfrei untersucht werden.

Ein zweiter Projektor entwirft auf beliebigem Ort der Perimeterkugel den Prüfreiz, dessen Leuchtdichte in logarithmischen Stufen zwischen 10^{-7} und 10^{3} asb geändert werden kann. Die Größe des Prüfreizes betrug bei allen Versuchen dieser Arbeit 30 Winkelminuten. Dies ist die größte Fläche, mit der das stäbchenfreie Areal in der Fovea zuverlässig isoliert geprüft werden kann. Ein Zeitverschluß ermöglichte es, jeden Testreiz für genau 1/2 sec darzubieten. Es wurde nur weißes Licht verwendet.

Für die Schwellenbestimmung wurde der Prüfreiz zunächst unterschwellig eingestellt und seine Darbietung unter

Steigerung der Leuchtdichte so lange wiederholt, bis die Wahrnehmungsschwelle sicher erreicht war. Zwei verschiedene Arten von Schwellen wurden bestimmt: Entweder wurde der Prüfreiz der bestehenden Umfeldleuchtdichte hinzugefügt (übliche Prüfung der Unterschiedsschwelle, hier bezeichnet als "U_x-Schwelle"), oder es wurde mit Hilfe einer besonderen Vorrichtung die Umfeldbeleuchtung für die halbe Sekunde der Reizdarbietung ausgeschaltet, der Prüfreiz befand sich dann stets im völlig dunklen Umfeld (diese Schwelle wird künftig als "U_{null}-Schwelle" bezeichnet). Bei dieser Prüfweise wurde der nächste Reiz frühestens im Abstand von 5 sec wieder angeboten. Vorversuche ergaben, daß dann der Adaptationsvorgang nicht gestört wird. Das für die Bestimmung der U_{null}-Schwelle notwendige Ausschalten der Umfeldbeleuchtung wurde durch Unterbrechung des Stromkreises bewirkt. Das dabei nicht vermeidbare Nachglühen der Lampen und damit des Umfeldes mußte in Kauf genommen werden.

Die Voradaptationsdauer zur Herstellung der Ausgangsempfindlichkeit für die Zeitkurven betrug stets genau 15 Minuten. Bei Voradaptation auf geringe Leuchtdichten wurde außerdem darauf geachtet, daß die Versuchsperson unmittelbar vorher nicht wesentlich höheren Adaptationsleuchtdichten ausgesetzt war. Unter diesen Bedingungen waren die Versuchsergebnisse mit geringer Streubereite reproduzierbar. Bei der zweiten Gruppe der Versuche bei stabilem Adaptationszustand brauchte nur - unabhängig von bestimmten Adaptationszeiten - darauf geachtet werden, daß keine Empfindlichkeitsänderung mehr im Gange war, wenn die Untersuchungen begonnen wurden.

Die Beobachtung des Prüffeldes durch die Versuchsperson erfolgte monokular. Das nicht untersuchte Auge wurde mit einer mattierten, aber transparenten Kunststoffklappe abgedeckt. Es war also annähernd denselben Adaptationsleuchtdichten ausgesetzt wie das untersuchte Auge, konnte sich aber an der Wahrnehmung der Testobjekte nicht beteiligen.

Die Leuchtdichten von Prüfpunkte und Umfeld wurden mit einem Bechstein-Leuchtdichtemesser in asb geeicht (1 nt = 1 cd/m^2 = 3.14 asb, 1 ml = 10 asb).

Zur Terminologie und Darstellungsweise

Sowohl für den Begriff der "Dunkeladaptation" als auch für den der "Helladaptation" muß unterschieden werden zwischen dem zeitlichen Vorgang der Anpassung und dem nach dessen Abschluß erreichten gleichbleibenden Empfindlichkeitszustand. Unter "Voradaptation" wird bei der Darstellung der Zeitkurven die Herstellung der Ausgangsempfindlichkeit der Netzhaut verstanden.

Wie schon im Absatz über die Methodik erwähnt wurde, müssen zwei Arten von Schwellenwerten unterschieden werden. Die eine entspricht der üblichen Unterschiedsschwelle, die andere unterscheidet sich von dieser dadurch, daß trotz beliebigen Adaptationszustandes der Prüfreiz stets im völlig dunklen Umfeld dargeboten wird. Diese Schwelle wird als "U_{null}-Schwelle" bezeichnet [+]. Dabei mußte jedesmal hinzugefügt werden, für welche Adaptationsleuchtdichte sie bestimmt wurde. Wurde z.B. die U_{null}-Schwelle bei Adaptation auf 100 asb Umfeldleuchtdichte bestimmt, so heißt sie "U_{null} bei 100 asb". Entsprechend wurde die übliche Unterschiedsschwelle als "U_x-Schwelle" bezeichnet, wobei für "x" die jeweils herrschende Umfeldleuchtdichte einzusetzen ist. Für die Adaptation auf völlige Dunkelheit sind "U_{null}" und "U_x" identisch.

Das Koordinatensystem der Zeitkurven enthält auf der Abszisse die Zeit in linearer Progression. Auf der Ordinate sind die Prüfmarkenleuchtdichten in logarithmischer Progres-

---

[+] Die U_{null}-Schwelle könnte auch "absolute Schwelle" genannt werden. Dieser Begriff wird jedoch in der Literatur in unterschiedlichem Sinne gebraucht. Er wird hier vermieden, um Mißverständnisse möglichst auszuschließen.

sion aufgetragen, und zwar so, daß die Leuchtdichte mit Entfernung von der Abszisse abnimmt. Diese Ordinatenteilung verhält sich reziprok zur sonst häufig gebrauchten Darstellungsart, bei der die Leuchtdichte mit Entfernung von der Abszisse zunimmt. Die Verwendung dieser reziproken Darstellung erlaubt es, die Ordinate als Maß für die Empfindlichkeit selbst zu benutzen.

Die Kurven der zweiten Versuchsgruppe bei stabilem Adaptationszustand haben die gleiche Ordinatenteilung wie die Zeitkurven, auf der Abszisse sind jedoch Netzhautorte abzulesen.

Versuchspersonen

Die Untersuchungen wurden an vier Personen im Alter von 22 bis 35 Jahren durchgeführt ("K", "D", "M" und "N"). Alle Versuchspersonen hatten voll funktionstüchtige Augen ohne Refraktionsfehler. Bei der geringen Zahl der Personen ist die Darstellung von Mittelwertkurven unzweckmäßig. Die Abbildungen und Berechnungen entsprechen den Versuchsergebnissen der Versuchsperson "K". Die Ergebnisse der übrigen Versuchspersonen zeigen grundsätzlich den gleichen Gang. Auf ihre Darstellung wird deshalb verzichtet.

Die Versuchsergebnisse

1.) Die Empfindlichkeitsänderung während des Adaptationsablaufes.

In diesem Abschnitt werden Versuchsergebnisse über den zeitlichen Ablauf von Dunkel- und Helladaptation an zwei Netzhautorten (0^o und 12^o nasal) dargestellt. Außer dem Einfluß der Adaptationsleuchtdichten auf die Kurven wird näher untersucht, welche Rolle jeweils die Pupillenweite und die bestehende Umfeldleuchtdichte für das Meßergebnis spielen.

Es wurden neun verschiedene Umfeldleuchtdichten verwendet, die nach Wunsch gewechselt werden konnten. Sie liegen im Bereich zwischen völliger Dunkelheit und "absoluter Blendung" und betrugen 0, 0,001, 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1000 und 6000 asb. Welche Variationsmöglichkeiten sich dabei für den Adaptationsvorgang von einer zur anderen Umfeldleuchtdichte ergeben, ist in Abb. 1 dargestellt. Außerdem ist in diese Tabelle eingetragen, für welche dieser Möglichkeiten Versuchsergebnisse vorliegen und von welchen Versuchspersonen sie stammen. Die Untersuchungen brauchten

nicht bei allen möglichen Umfeldkombinationen durchgeführt zu werden, da die Ergebnisse einer Umfeldkombination in manchen Fällen die Untersuchung mit anderen überflüssig machte.

Die Abb. 2 enthält drei Kurven, die beim Übergang von 6000 auf 0 asb gewonnen wurden. Die obere Kurve ist mit großem Prüffeld von 14 Grad Durchmesser gewonnen und entspricht etwa den in der Klinik üblichen Adaptationsprüfungen. Die beiden anderen Kurven wurden mit der auch in allen späteren Versuchen gebrauchten 30-min-Marke gewonnen, und zwar im Netzhautzentrum und bei 12 Grad. Daß das Niveau der Kurve für das große Prüffeld wesentlich höher liegt als das der anderen, wird als Summationseffekt erklärt.

Abb. 3 zeigt den Streuungsbereich für eine der Umfeldkombinationen, nämlich für den Übergang von 6000 auf 0 asb. Die Kurven wurden an drei Tagen für die Versuchsperson "K" bestimmt. Die Adaptationskurven des Gesichtsfeldzentrums sind in dieser Abbildung aus Gründen der Übersichtlichkeit nach unten verschoben worden.

Die Änderung der Versuchsbedingungen führte zu Ergebnissen, die in den nächsten Abbildungen zusammengestellt sind. Zunächst wurden U_x-Schwellen bestimmt, in den meisten Kurven sind die Schwellenhöhen am Ende der Voradaptation mit eingetragen.

Abb. 4a zeigt das Verhalten der fovealen Adaptation, wenn nach Voradaptation auf 6000 asb die Umfeldbeleuchtung in verschiedener Weise herabgesetzt wird. Abb. 4b gibt für die Fovea den Ablauf der Helladaptation wieder: nach voller Dunkelanpassung wurde auf verschieden hohe Umfeldleuchtdichten adaptiert. Der Ablauf der Helladaptation in der Netzhautperipherie (Abb. 4c) ist der des Zentrums sehr ähnlich.

Setzt man nach Voradaptation auf 6000 asb die Adaptationsleuchtdichte verschieden stark herab und prüft die Empfindlichkeit in der Netzhautperipherie, so ergeben sich die Kurven der Abb. 5. Für die Netzhautperipherie gilt auch Abb. 6. Hier wurde jedoch nicht von gleicher Voradaptation ausgegangen, sondern diese wurde variiert und die Adaptation erfolgte stets auf volle Dunkelheit. Es fällt auf, daß schon nach Voradaptation auf 1000 asb die Adaptationskurve keinen KOHLRAUSCHschen Knick mehr zeigt, sie beginnt etwa im Niveau des Knickes.

Die nächsten Abbildungen enthalten Adaptationsvorgänge in der Darstellung durch U_{null}-Schwellen. Zum Vergleich von U_x- und U_{null}-Schwellen zeigt Abb. 7 beide Schwellenkurven für den Übergang von 6000 zu 0,001 asb Umfeldleuchtdichte. In der Fovea gleichen sich hier U_x- und U_{null}-Schwellen, in der Peripherie tun sie es bis etwa zur 6. Minute, dann weichen sie allmählich auseinander. Es erscheint bemerkenswert, daß vor dem Auseinanderweichen der Kurven das Umfeld subjektiv als völlig dunkel empfunden wird. Zu demselben Zeitpunkt, an dem die Versuchsperson spontan bemerkt, daß das Umfeld nicht völlig dunkel ist und es sich nur bei Bestimmung der U_{null}-Schwelle verdunkelt, beginnen auch U_x- und U_{null}-Schwellen sich zu unterscheiden.

Die Abb. 8 enthält ausschließlich U_{null}-Schwellen, und zwar für den Übergang von 6000 asb auf geringe Adaptationsleuchtdichten. Die analogen U_x-Schwellen fanden sich in Abb. 5. Der Unterschied zwischen zwei entsprechenden Kurven dieser beiden Abbildungen ist umso größer, je höher die Adaptationsleuchtdichte ist, während für die Adaptationsleuchtdichte 0 asb U_x- und U_{null}-Schwellen identisch sind.

Daß der Verlauf der U_x- und U_{null}-Schwellenkurven nicht immer gleichsinnig ist, kann aus Abb. 9 entnommen werden. Es handelt sich dabei um den Ablauf der zentralen und peripheren Helladaptation nach voller Dunkelanpassung. Unmittel-

bar nach dem Einschalten der Adaptationsbeleuchtung liegen die U_x-Schwellen höher, die U_{null}-Schwellen niedriger als das später eingestellte Niveau.

In den Versuchen der Abb. 10 und 11 wurde geprüft, welchen Einfluß die Pupillenweite auf den Verlauf der Adaptationskurven nehmen kann. Für die Kurven der Abb. 10 betrug die Voradaptation 6000 asb, adaptiert wurde auf völlige Dunkelheit. Im einen Fall ließen wir die Pupille unbeeinflußt (wie die photographische Ausmessung ergab, öffnete sie sich nach der Verdunkelung von 2,6 auf 7,7 mm Ø), im anderen Fall war die Pupille vor dem Versuch durch Pilocarpin auf einen konstanten Durchmesser von 2 mm gebracht worden. Für die im Perimeter gegebene Beobachtungsentfernung von 30 cm brauchte die gleichzeitige Myopisierung nicht korrigiert zu werden.

Für Abb. 11 betrug die Voradaptationsleuchtdichte 1000 asb. Einmal wurde wieder bei unbeeinflußter Pupille untersucht (Öffnung nach Verdunkelung von 3,0 auf 7,7 mm Ø), im zweiten Versuch war die Pupille durch Mydriaticum "Roche" erweitert worden und hatte einen konstanten Durchmesser von 8 mm. Durch Vorschalten eines Korrektionsglases von +3,0 sph wurde die Wirkung der begleitenden Akkommodationslähmung ausgeglichen.

Mit Abb.12 wurde eine weitere Frage zu beantworten versucht. Bei der üblichen Prüfweise der Empfindlichkeitsänderungen besteht je nach Umfeld-Leuchtdichtekombination ein mehr oder weniger großer Abstand zwischen der Schwellenleuchtdichte am Ende der Voradaptation und dem ersten Schwellenwert nach Wechsel der Umfeldbeleuchtung. Es ist nicht anzunehmen, daß die Empfindlichkeit der Netzhaut sich in solcher Weise ändert, sondern daß dies durch die Untersuchungsmethode bedingt ist. Abb. 12a entspricht der üblichen Prüfung der Unterschiedsschwellen, hier aufgezeichnet als U_x-Schwellen, für den Übergang von 1000 zu

0,001 asb Umfeldleuchtdichte. Die Schwellenhöhe während der Voradaptation ist eingetragen. Bestimmt man statt der U_x-die U_{null}-Schwellen, erhält man das Kurvenbild von 12b. Die Höhe des erwähnten Schwellenabstandes ist bereits erheblich geringer. Wird zusätzlich die Veränderung der Pupillenweite berücksichtigt (hier umgerechnet entsprechend den Ergebnissen der Abb. 10), so ergibt sich die Kurve 12c. Hier ist der Anschluß der Adaptationskurve an die am Ende der Voradaptation gemessene Schwellenhöhe annähernd erreicht.

2.) Die Empfindlichkeitsverteilung bei verschiedenen gleichbleibenden Adaptationszuständen der Netzhaut.

Nachdem bisher nur über den Zeitablauf der Adaptation berichtet wurde, sollen jetzt von verschiedenen Netzhautorten die Schwellenwerte nach beendetem Adaptationsvorgang dargestellt werden. Für die Herstellung der Adaptationszustände wurden dieselben neun verschiedenen Umfeldleuchtdichten verwendet, die auch im ersten Teil der Untersuchungen benutzt wurden. Acht verschiedene Netzhautorte wurden geprüft:
0^o, 2^o, 4^o, 7^o, 10^o, 12^o, 15^o und 20^o nasal. Damit ist sowohl das stäbchenfreie Areal der Macula als auch der periphere Bereich der höchsten Empfindlichkeitssteigerung bei Dunkelanpassung erfaßt worden. Die Streubreite der Schwellenbestimmungen liegt bei $\pm$ 1 log. Stufe.

Die Abb. 13a enthält U_x-Schwellen für unbeeinflußte Pupille. Die jeweiligen Umfeldleuchtdichten sind neben jeder Kurve verzeichnet. Um die Pupillenweiten genau messen zu können, wurde für jede Adaptationsleuchtdichte das Auge der Versuchsperson photographiert und die Pupillenöffnung auf dem Film ausgemessen. Die Werte sind ebenfalls der Abbildung zu entnehmen. Die Untersuchungen der Abb. 13b unterscheiden sich von 13a nur dadurch, daß vor dem Versuch die Pupille mit Mydriaticum "Roche" erweitert wurde. Der Durchmesser betrug danach konstant 8 mm. Für die Versuche der

Abb. 13c wurde die Pupille der Versuchsperson konstant eng gehalten (Durchmesser 2 mm). Die Korrektion erfolgte bei weiter Pupille durch ein Glas von der Brechkraft +3,0 sph., bei enger Pupille war sie überflüssig.

Die Abbildung 13d soll zum Vergleich dienen und ist auf rechnerischem Wege entstanden: Die Schwellenleuchtdichten der Abb. 13a wurden unter Berücksichtigung der ausgemessenen Pupillenweiten zunächst in Troland umgerechnet. Aus den erhaltenen Trolandwerten konnte wiederum abgeleitet werden, welche Schwellenleuchtdichten bei irgendeinem anderen Pupillendurchmesser zu erwarten gewesen wären. Abb. 13d enthält solche Werte, berechnet für einen konstanten Pupillendurchmesser von 2 mm. Zur Umrechnung wurden folgende Formeln benutzt:
Troland = Leuchtdichte in nit x Pupillenfläche.
1 nit = 3,14 asb, also: Troland = Leuchtdichte in asb x r^2 der Pupille. Zur Berechnung erwarteter Schwellenleuchtdichten brauchte die Formel nur umgestellt zu werden: $\frac{\text{Troland}}{r^2}$ = asb. Träfe die mit der Einheit "Troland" angenommene Proportionalität zwischen Pupillenfläche und Netzhautbeleuchtungsstärke zu, so müßten die berechneten Kurven der Abb. 13d den Versuchsergebnissen der Abb. 13c gleichen.

Für die Abb. 14 wurde das Versuchsprogramm der Abb. 13 wiederholt und statt der U_x-Schwellen die U_{null}-Schwellen bestimmt. Bei den Versuchen der Abb. 14a blieb wieder die Pupille unbeeinflußt, für 14b wurde sie mit Mydriaticum "Roche" erweitert und für 14c mit Pilocarpin verengt. Die Korrektion war dieselbe wie bei Abb. 13 beschrieben. Die Adaptationsleuchtdichten und Pupillenweiten von 14a gleichen denen von 13a. Auch hier wurden zum Vergleich die Schwellenwerte der Abb. 14a über die Einheit Troland in die Werte umgerechnet, die bei einem konstanten Pupillendurchmesser von 2 mm als Schwellenleuchtdichten erwartet werden müßten. Die erhaltenen Kurven sind in 14d den entsprechenden Versuchsergebnissen in 14c gegenübergestellt.

Besprechung der Ergebnisse

Abgesehen von der speziellen Fragestellung nach dem Einfluß von Pupillenweite und Umfeldleuchtdichte brachten die Untersuchungen einige andere Ergebnisse, die zu Beginn besprochen werden sollen.

Einige der Versuche über den zeitlichen Adaptationsablauf haben direkte Beziehungen zu zwei Arbeiten, die von CRAWFORD (1937) und HATTWICK (1954) veröffentlicht wurden. Es handelt sich um die Adaptation der Netzhautperipherie auf Dunkelheit und herabgesetzte Beleuchtung. Diese Frage wurde für die vorliegende Arbeit in den Versuchen der Abb. 5 behandelt. Obwohl unsere Versuchsanordnung eine andere war, können doch die Ergebnisse mit denen von CRAWFORD und HATTWICK verglichen werden.

Aus der Veröffentlichung CRAWFORDs sind die betreffenden Kurven als Abb. 15 wiedergegeben. Der Autor zog daraus den Schluß, daß zwischen der Adaptation auf völlige Dunkelheit und Adaptation auf herabgesetzte Beleuchtung eine einfache Beziehung bestehe: "-... Jede Kurve folgt der Adaptationskurve auf Null, bis die Schwelle annähernd erreicht ist, die der angebotenen Adaptationsbeleuchtung entspricht. Dann wird die Kurve plötzlich flach und bleibt konstant". HATTWICK setzt seine Ergebnisse (wiedergegeben als Abb. 16) denen CRAWFORDs entgegen mit der Feststellung, daß sich die Kurven stets dem jeweiligen Endwert nur allmählich nähern und diesen ohne scharfen Übergang erreichen. Diese Anschauung stimme auch besser überein mit den gegenwärtigen Theorien über den Aufbau und Zerfall der lichtempfindlichen Sehstoffe.

Vergleichen wir nun die eigenen Ergebnisse (Abb. 5) mit diesen Befunden. Wenn die durch unsere gegensinnige Ordinatenteilung bedingte spiegelbildliche Darstellung berücksichtigt wird, besteht auf den ersten Blick Ähnlichkeit mit

den Kurven, die HATTWICK veröffentlichte. Werden die Schwellenwerte der Abb. 5 zum besseren Vergleich in das von HATTWICK gebrauchte Koordinatensystem eingetragen, so ergibt sich Abb. 16a. Trotz der unterschiedlichen Versuchsbedingungen sind sich die Bilder auffallend ähnlich. Bei der Beurteilung der andersartigen Kurvenbilder von CRAWFORD muß berücksichtigt werden, daß CRAWFORD die Zeitachse nicht linear, sondern logarithmisch teilte. Werden die Schwellenwerte unserer Versuche aus Abb. 5 in das Koordinatensystem übertragen, das CRAWFORD verwendete, so ergibt sich in Abb. 15a überraschenderweise ein Bild, das den CRAWFORDschen Kurven ebenso stark ähnlich ist wie die Abb. 16a den HATTWICKschen Kurven. Wenn aber - nur abhängig von der Art der graphischen Darstellung - die Meßwerte der Abb. 5 einmal den Kurven von HATTWICK, dann denen von CRAWFORD entsprechen, so muß gefolgert werden, daß die Befunde dieser beiden Autoren auch untereinander sich nicht ausschließen, sondern vielmehr gegenseitig bestätigen. Der Gegensatz, der zu bestehen schien, war nur ein scheinbarer.

Der Vergleich beider Arten der Darstellung führte jedoch zu dem Ergebnis, daß die logarithmische Teilung der Zeitachse hier weniger zweckmäßig ist als eine lineare. Wenn nämlich bei logarithmischer Zeitteilung z.B. ein "plötzliches Abknicken" der Kurven gefunden wird, so hängt es ganz von der Lage im Koordinatensystem ab, welchen Zeitraum diese Veränderung umfaßt. In unserer Zeitvorstellung sind wir aber gewohnt, in absoluten Zeitmaßen zu denken und machen die "Plötzlichkeit" eines Ereignisses nicht vom zeitlichen Abstand desselben abhängig. Dementsprechend können Darstellungen mit logarithmischer Zeitteilung leicht zu Mißverständnissen führen.

Zwei weitere von der Fragestellung des Themas noch unabhängige Versuchsergebnisse sollen kurze Erwänung finden. Wie die Abb. 4 zeigt, liegen nach Änderung der Umfeldleuchtdichte die Schwellenleuchtdichten der Prüfmarke zu-

nächst höher als bei voller Adaptation auf dieses Umfeld. Die Unterschiedsempfindlichkeit ist also schlechter als nach abgeschlossenem Adaptationsvorgang. Diese Tendenz ist unabhängig davon, ob die während der Voradaptation bestehende Schwelle höher (Abb. 4a) oder niedriger (4b und c) lag als das nach dem Wechsel der Umfeldleuchtdichte eingestellte Niveau. Zunächst könnte man annehmen, daß die Schwellenkurven immer etwa vom Niveau bei der Voradaptation ausgehen und von dort aus ihrem neuen Wert zustreben. Für die übliche Unterschiedsschwelle (U_x-Schwelle) trifft dies nicht in jedem Fall zu, sondern immer besteht die höchste Unterschiedsempfindlichkeit der Netzhaut für eine bestimmte Umfeldleuchtdichte nur dann, wenn sie auf diese Leuchtdichte voll adaptiert ist.
Obwohl die Abhängigkeit des Adaptationsablaufes vom Ausmaß der Voradaptation durch viele Veröffentlichungen bekannt ist, soll der in Abb. 6 gegebene Befund besonders erwähnt werden:
Nur nach Voradaptation auf 6000 asb zeigen die Dunkeladaptationskurven der Netzhautperipherie den KOHLRAUSCHschen Knick, dessen Vorhandensein anzeigt, daß im Vergleich zum Dämmerungsapparat zunächst der Tagesapparat die höhere Empfindlichkeit besitzt. Nach Voradaptation auf nur mäßig hohe Tagesleuchtdichten (10, 100 asb) fehlt der Knick und die Kurven setzen schon weit über dem Niveau des in der untersten Kurve erkennbaren Knickes ein. Auch nach Voradaptation auf 1000 asb zeigt die Adaptationskurve keinen Knick und steigt ohne Verzögerung rasch an. Es scheint demnach, daß der Dämmerungsapparat des Auges auch bei mittleren Tagesleuchtdichten noch sofort ansprechbar bleibt. Erst bei höheren Leuchtdichten als 1000 asb wird er so stark gehemmt, daß die Empfindlichkeitssteigerung nach Verdunkelung des Umfeldes zunächst vom Tagesapparat geleistet wird.

Im Folgenden sollen die Versuchsergebnisse unter der im Thema gegebenen speziellen Fragestellung erörtert werden. Zunächst ist zu prüfen, welche Aussagen sich über die Rolle

der Pupillenweite und ihrer Änderung bei der Bestimmung von Schwellenleuchtdichten machen lassen.

In den Versuchen der Abb. 10 und 11 wurde versucht, den Einfluß unterschiedlicher Pupillenweiten für den Zeitablauf der Dunkeladaptation festzustellen. Die eine Kurve der Abb. 10 entstand bei unbeeinflußter Pupille, die andere wurde unter Pilocarpinwirkung bei konstant enger Pupille aufgenommen. Während der Voradaptation auf 6000 asb war auch die unbeeinflußte Pupille eng gestellt, die Netzhautbeleuchtungsstärke und damit der Grad der Ausblendung mußte etwa gleich sein, es war demnach auch eine gleiche Form der folgenden Adaptationskurven zu erwarten. Nach der Verdunkelung des Umfeldes öffnete sich die normale Pupille, die unter Pilocarpinwirkung stehende blieb eng. Eine gleichhelle Prüfmarke mußte dem Auge mit enger Pupille dunkler erscheinen als dem anderen. Dies mußte sich in einer Schwellenerhöhung ausdrücken, wie sie sich in der entsprechenden Kurve auch zeigt. Die beiden Kurven sehen so aus, als seien sie parallelverschoben. Die erst allmählich erfolgende Erweiterung der normalen Pupille im Dunklen kommt nur angedeutet in einem etwas steileren Anstieg der Kurve in den ersten Minuten zum Ausdruck.

Es soll nun anhand einer Stichprobe geprüft werden, ob der Abstand beider Kurven in Abb. 10 der Voraussetzung entspricht, unter der auch die Einheit "Troland" eingeführt wurde, daß nämlich die Netzhautbeleuchtungsstärke der Pupillenfläche proportional sei.

Für die enge Pupille liegt in der 33. Minute die Leuchtdichteschwelle der Netzhautperipherie bei 0,0016 asb. Der Pupillendurchmesser betrug 2 mm. Gilt das Proportionalitätengesetz, so kann die Netzhautbeleuchtungsstärke in Troland berechnet werden. Dafür gilt die Formel: Leuchtdichte in asb x r^2 = Troland. r^2 ist in unserem Fall gleich 1, es ergibt sich 0,0016 troland. Aus diesem Wert soll berechnet

werden, welche Schwellenleuchtdichte bei weiter Pupille (die photographische Ausmessung im entsprechenden Versuch ergab 7,7 mm Ø) bestehen müßte. Dazu muß der Troland-Wert durch r^2 der weiten Pupille geteilt werden: 0,0016 : 14,82 = 0,000108 asb. Die tatsächliche Leuchtdichtenschwelle liegt bei weiter Pupille jedoch bei 0,00032 asb und damit 5 logarithmische Stufen höher als der berechnete Sollwert. Diese Abweichung ist beträchtlich, sie beträgt in logarithmischen Stufen fast die Hälfte der berechneten Differenz. In anderen bei Dunkeladaptation gewonnenen Kurven (in Abb. 13a, c, d, 14a, c, d) kehrt dieser Betrag der Abweichung ziemlich genau wieder. Da Refraktionsänderungen auskorrigiert worden waren, konnten sie für die Abweichung nicht verantwortlich sein.

Die Einheit "Troland" war auf der Basis der Proportionalität zwischen Pupillenfläche und Netzhautbeleuchtungsstärke eingeführt worden. Die Gültigkeit dieser Voraussetzung wurde bereits durch die Feststellung des nach STILES und CRAWFORD benannten Effektes eingeschränkt. Diese beiden Autoren fanden, daß das Zentrum der Pupille "helligkeitswirksamer" ist als die Randgebiete. TEUCHER hat "mittlere Wirkungszahlen" angegeben, welche die Abweichungen vom Proportionalitätsgesetz für weiße und farbige Lichter wiedergeben sollen. Sie erlauben bei unseren andersartigen Versuchsbedingungen nur eine ungefähre Abschätzung und erklären die vorhandenen Abweichungen nur zu einem kleinen Teil. Vielmehr muß angenommen werden, daß zusätzlich noch die schlechtere optische Qualität der brechenden Medien des Auges bei weiter Pupille eine Rolle spielt. Die Unschärfe der Abbildung drückt sich dann in einer Erhöhung der Schwellenleuchtdichten aus.

Abbildung 11 vergleicht zwei Adaptationskurven, deren eine bei Mydriasis der Pupille aufgenommen wurde. Die Pupillenweiten bei beiden Versuchen unterscheiden sich jetzt während der Voradaptation: die normale Pupille hatte einen Durch-

messer von 2.6 mm, die mydriatische einen von 8 mm. Es ist also zu erwarten, daß bei der Voradaptation auf 1000 asb die weite Pupille eine höhere Netzhautbeleuchtungsstärke verursacht als die normale, während nach der Verdunkelung die Pupillenweiten sich angleichen, indem die normale Pupille sich erweitert. Die beiden Kurven in Abb. 11 unterscheiden sich in ihrer Form. Diejenige nach Voradaptation mit weiter Pupille ähnelt den Kurven der Abb. 10, die nach Voradaptation auf 6000 asb gewonnen wurden.

Es soll auch hier geprüft werden, ob die Umrechung in Troland und damit das Proportionalitätsgesetz anwendbar ist. Die normale Pupille bei Voradaptation auf 6000 asb hatte einen Durchmesser von 2,6 mm, die Netzhautbeleuchtungsstärke betrug entsprechend der schon erwähnten Formel $6000 \times 1,3^2 = 10\,140$ Troland. Die bei Voradaptation auf 1000 asb und weiter Pupille aufgenommene Adaptationskurve hat eine sehr ähnliche Form, es ist also anzunehmen, daß die Netzhautbeleuchtungsstärke während der Voradaptation etwa gleich war. Die weite Pupille hatte einen Durchmesser von 8 mm, die Berechnung der Netzhautbeleuchtungsstärke ergibt $1000 \times 4^2 = 16\,000$ Troland. In diesem Fall stimmen die Größenordnungen - im logarithmischen Maßstab - recht gut überein.

Es besteht also ein Unterschied zwischen dem Einfluß der Pupillenweite auf die Netzhautbeleuchtungsstärke einer kleinen Prüfmarke und auf diejenige einer großen Umfeldfläche. Zur Deutung der von der Berechnung abweichenden Versuchsergebnisse der Abb. 10 war die zunehmende Abbildungsunschärfe bei weiter Pupille herangezogen worden. Für die Helligkeitswirkung einer kleinen Prüfmarke muß die Abbildungsqualität eine Rolle spielen. Dagegen ist die Abbildungsqualität einer großen homogenen Umfeldfläche für deren Helligkeitswirkung auf der Netzhaut viel weniger von Belang. Die Abweichungen von der Proportionalitätsbeziehung, die besonders bei der Berechnung für kleine Objekte auf-

treten müssen, sind entsprechend geringer. Im Fall der Versuche von Abb. 11 kann jedenfalls gesagt werden, daß das Ausmaß der Ausblendung bei der Voradaptation besser durch Trolandwerte als durch die Leuchtdichte der Umfeldfläche allein charakterisiert werden kann.

Mit dem Einfluß der Pupillenweite haben sich noch andere Versuche befaßt, deren Ergebnisse in Abb. 13 und 14 zu finden sind. Die Kurven unter 13b und 14b gelten für eine konstant weite Pupille von 8 mm Durchmesser. Ein charakteristischer Unterschied zu den bei unbeeinflußter Pupille gewonnenen Kurven ist nicht festzustellen. Für dunkles Umfeld und geringe Adaptationsleuchtdichten war dies zu erwarten, denn auch die normale Pupille ist dann erweitert. Bei höheren Leuchtdichten jedoch erwartet man zunächst, daß die weite Pupille eine niedrigere Schwellenkurve verursacht. Dies ist nicht der Fall. Es ist wahrscheinlich, daß die Kurven den bei variabler Pupille hergestellten nicht eigentlich gleichen, sondern daß gegensätzliche Wirkungen sich etwa aufheben: Bei künstlich erweiterter Pupille und hohen Umfeldleuchtdichten ist die Netzhautbeleuchtungsstärke höher als bei beweglicher, also im hellen Umfeld enggestellter Pupille. Dementsprechend wird die Netzhaut stärker helladaptiert sein, so daß die Schwellenleuchtdichten höher liegen müßten. Die wegen der weiten Pupille erwartete Erniedrigung der Schwellen kann dadurch aufgehoben worden sein. Es kommt hinzu, daß für die Prüfmarke bei weiter Pupille schlechtere Abbildungsverhältnisse angenommen werden können, während gleichzeitig deren Helligkeit erhöht wird. Jedenfalls ist für unsere Untersuchungen bei weiter Pupille das Proportionalitätsgesetz nicht anwendbar.

Die Untersuchungen bei konstant enger Pupille schaffen jedoch deutliche Veränderungen im Kurvenverlauf (Abb. 13c und 14c). Der Vergleich mit den unter d aufgeführten Kurvengruppen soll zeigen, inwieweit hier eine Proportionalität zwischen Pupillenfläche und Schwellenleuchtdichte be-

steht. Diese Vergleichskurven sind aus den unter a dargestellten Ergebnissen mit Berücksichtigung der jeweiligen Pupillenweite berechnet worden. Die Umrechnung wurde bereits bei der Darstellung der Versuchsergebnisse erläutert. Die unter a der Abb. 13 und 14 angegebenen Pupillenweiten wurden auf photographischen Aufnahmen ausgemessen. Sie entsprechen recht genau den von HARTINGER für verschiedene Beleuchtungsstärken bestimmten Werten. Aus ihnen konnten die Schwellenwerte in Troland berechnet werden. Daraus wiederum wurde abgeleitet, welche Schwellenleuchtdichten bei einer Pupillenöffnung von 2 mm erwartet werden müßten, wenn der Gebrauch der Einheit "Troland" sinnvoll sein sollte. Die Abweichung der tatsächlichen Versuchsergebnisse von den berechneten wurde bereits im Zusammenhang mit der Besprechung der Abb. 10 erörtert. Immerhin zeigen diese Versuchsergebnisse die erwartete Tendenz, wenn auch nicht so ausgiebig, wie den Berechnungen entspräche.

Schon bei der Besprechung der Versuche mit erweiterter Pupille wurde angenommen, daß bei einer veränderten Netzhautbeleuchtung sich auch der Adaptationszustand selbst ändert. Dieselbe Möglichkeit ist für die Abweichung der Versuchsergebnisse bei enger Pupille (Abb. 13c, 14c) von den Berechnungen (Abb. 13d, 14d) auch einzuräumen. Bei genauerem Vergleich der Kurven besteht nicht nur eine Abweichung im Niveau der Kurven, sondern auch ihre Formen sind in bestimmter Weise verändert. So ähnelt z.B. die bei Adaptation auf 0,1 asb gewonnene Kurve der Abb. 13c ihrer Form nach in Abb. 13d mehr derjenigen, die bei der nächst niedrigeren Adaptationsleuchtdichte, 0,01 asb, zu erwarten wäre. Man muß also schließen, daß gegenüber den berechneten Kurven eine stärkere Dunkeladaptation vorliegt. Dies ist wieder ein Ausdruck dafür, daß der Adaptationszustand der Netzhaut nicht durch die Umfeldleuchtdichte, sondern durch die Netzhautbeleuchtungsstärke festgelegt wurd. Bei enger Pupille ist diese relativ geringer, die Netzhaut antwortet darauf mit stärkerer Dunkeladaptation. Bei der

Adaptation auf ein völlig dunkles Umfeld kann aber die Wirkung der engen Pupille nicht mehr durch eine weitere Steigerung der Netzhautempfindlichkeit zum Teil ausgeglichen werden. Die Versuchsergebnisse müssen dann den berechneten stärker entsprechen als es bei anderen Umfeldleuchtdichten der Fall ist. Die bei Dunkeladaptation gewonnenen Kurvenbilder bestätigen diese Annahme.

Mit der Verschiebung des Adaptationszustandes läßt sich jedoch das Ausmaß der Abweichung der berechneten Kurven von den entsprechenden Versuchsergebnissen nicht voll erklären, und es muß bei der Feststellung bleiben, daß bei Lichtsinnprüfungen die Wirkung unterschiedlicher Pupillenweiten nie so groß ist, wie sie dem physikalischen Öffnungsverhältnis entsprechen würde.

Ein völlig anderes Problem ist die Rolle der Umfeldleuchtdichte bei der Bestimmung der Schwellenwerte. Es ist schon ausgeführt worden, daß die verschiedenen bei den Untersuchungen verwendeten Umfeldleuchtdichten nicht nur den Adaptationszustand der Netzhaut festlegen, sondern daß sie den Leuchtdichtenunterschied mitbestimmen, der eine angebotene Prüfmarke wahrnehmbar macht. Verschiedene Umfeldleuchtdichten werden auch in verschiedener Weise die Schwellenbestimmung beeinflussen. Um diesen Einfluß kennenzulernen, mußte eine Untersuchungsmöglichkeit gefunden werden, die es erlaubt, trotz beliebiger Adaptationsbedingungen die Prüfmarke vor einem gleichbleibenden Hintergrund darzubieten.

Mit der "U_{null}-Schwelle" wurde diese Forderung zu erfüllen versucht. Eine Reihe von Versuchsergebnissen liegen vor, die denen mit Bestimmung der U_x-Schwelle (übliche Unterschiedsschwelle) gegenübergestellt werden können. Einige wesentliche Unterschiede sollen nun besprochen werden.

Von den Zeitkurven der ersten Versuchsgruppe müssen in diesem Zusammenhang die Abb. 5 und 8 miteinander verglichen werden. Am stärksten fällt auf, daß die Kurven der U_{null}-Schwellen stärker zusammenrücken. Für die Adaptation auf 0 asb sind der Methode nach U_x- und U_{null}-Schwellen identisch. Die anderen einander entsprechenden Kurven unterscheiden sich umso stärker, je höher die jeweilige Adaptationsleuchtdichte ist. Daß die Kurven der U_{null}-Schwellen jedoch nicht durch einfache Parallelverschiebung der U_x-Schwellenkurven entstehen, wird deutlich in Abb.17 gezeigt, in der beide Kurven für einen Adaptationsvorgang zusammengestellt sind.
Für Abb. 14 wurden die U_{null}-Schwellen an verschiedenen Netzhautorten bei gleichbleibendem Adaptationszustand geprüft und dargestellt. Die Versuche wurden gleichzeitig zur Bestimmung des Einflusses der Pupillenweite unternommen. Wenn man davon hier absieht, interessiert besonders der Vergleich der Abb. 14a mit 13a. Auch hier rücken die Kurven der U_{null}-Schwellen gegenüber den U_x-Schwellen deutlich zusammen. Da auch die Kurvenformen etwas anders sind, mußte geprüft werden, ob die Prüfmethode der U_{null}-Schwelle etwa Adaptationsänderungen oder Veränderungen der Pupillenweite auslöst. Die Verdunkelung des Umfeldes bei der Prüfreizdarbietung, die 1/2 sec dauert, kann eine merkbare Adaptationsänderung nicht bewirken. In dieser Zeit könnte aber die Pupillenöffnung schon verändert werden. Aus den Arbeiten von PETERSEN und SEITZ geht jedoch hervor, daß zunächst eine Latenzzeit von etwa 0,22 sec besteht; die anschließend möglicherweise einsetzende Erweiterung ist in der noch übrigen Zeit so wenig ausgiebig, daß sie hier vernachlässigt werden kann. Als Ursache für die bestehenden Unterschiede zwischen U_x- und U_{null}-Schwellenkurven kommen also doch nur die bei der Bestimmung der U_x-Schwelle gleichzeitig bestehenden Umfeldleuchtdichten infrage.

Die Empfindlichkeitsverteilung in der Netzhaut kann je nach bestehendem Adaptationszustand sehr verschieden sein.

Sobald bei abnehmender Adaptationsleuchtdichte der zentrale Gipfel der Empfindlichkeitskurve sich abflacht, um schließlich von der Empfindlichkeit der Netzhautperipherie überflügelt zu werden, nimmt man den Übergang vom Tages- zum Dämmerungssehen an. Für die U_x-Schwellen liegt dieser Übergang bei Adaptationsleuchtdichten von 0,1 bis 0,01 asb (Abb. 13a). Bei der Bestimmung der U_{null}-Schwellen liegt unerwarteterweise dieser Umschlagspunkt bereits bei Adaptationsleuchtdichten zwischen 10 und 100 asb. Beträgt die Adaptationsleuchtdichte z.B. 1 asb, so besteht für die U_x-Schwelle noch eine deutliche zentrale Empfindlichkeitsspitze, während für die U_{null}-Schwelle die periphere Empfindlichkeit bereits die zentrale übertroffen hat. Dieser Befund wurde in Abb. 17 noch einmal für sich dargestellt. Er muß als Ansprechen des Dämmerungsapparates gewertet werden. Diese Ansprechbarkeit beginnt anscheinend bei wesentlich höheren Adaptationsleuchtdichten, als es die U_x-Schwellenwerte vermuten lassen. Zu Beginn der Besprechung war anhand der Abb. 6 betont worden, daß mittlere Tagesleuchtdichten bis 100, ja 1000 asb nicht ausreichen, um bei anschließender Dunkeladaptation in den Kurven einen KOHLRAUSCHschen Knick zu erzeugen. Daraus hatte entnommen werden müssen, daß der Dämmerungsapparat auch bei diesen mittleren Leuchtdichten mindestens sofort ansprechbar bleibt. Die Abb. 14a bekräftigt diese Aussage und macht im Vergleich zur Abb. 13a darüberhinaus deutlich, wie stark und auch je nach Netzhautort verschieden eine auch während des Prüfvorganges bestehende Umfeldleuchtdichte auf das Meßergebnis einwirkt.

Die Möglichkeit, durch Bestimmung der U_{null}-Schwellen den unmittelbaren Einfluß des Umfeldes auf die Schwellenleuchtdichten auszuschalten, führte noch zu anderen Ergebnissen: Das schon erwähnte Zusammenrücken der Kurven bei Bestimmung der U_{null}-Schwellen im Vergleich zu den Kurven der U_x-Schwellen (vgl. Abb. 5 mit 8, Abb. 13 mit 14) muß dahingehend gedeutet werden, daß die Empfindlichkeit der Netzhaut bei verschiedenen Adaptationszuständen nicht so ver-

schieden ist, wie die U_x-Schwellenkurven den Anschein geben. Das ermöglicht die Erklärung einer anderen Eigenart der üblichen Adaptationskurven:

Vergleicht man die U_x-Schwelle bei Adaptation auf höhere Leuchtdichten mit dem ersten Schwellenwert nach Verdunkelung des Umfeldes, so erfolgt scheinbar ein erheblicher Sprung in der Netzhautempfindlichkeit (z.B. Abb. 12a). Es konnte gezeigt werden, daß die Netzhaut nicht eine solch rasche Empfindlichkeitsänderung erleidet, sondern daß dieser Sprung mit der vorgenommenen Änderung der Umfeldleuchtdichte weitgehend erklärt werden kann, da die Schwellenwerte für beide Umfeldleuchtdichten bei Bestimmung von U_{null}-Schwellen wesentlich näher beieinander liegen (Abb. 12b). Wenn man außerdem die Änderung der Pupillenweite berücksichtigt (Abb. 12c), so ist der Anschluß der Adaptationskurve an das Empfindlichkeitsniveau während der Voradaptation annähernd erreicht. Der "Sprung" der Schwellenwerte (z.B. auch in Abb. 5) bei dem Übergang zu einer anderen Umfeldleuchtdichte ist also ein Kunstprodukt.

Für den Ablauf der Helladaptation läßt sich mit unserer Versuchsanordnung der eben erwähnte scheinbare Schwellensprung nicht so weit reduzieren wie bei den anderen Versuchen, doch ist das Kurvenbild (Abb. 9) trotzdem aufschlußreich: Die U_{null}-Schwellenkurven nach Einschalten der Umfeldbeleuchtung kommen aus der Richtung der bei der vorherigen Dunkeladaptation bestehenden Empfindlichkeitswerte, während die Kurven der U_x- Schwelle sich entgegengesetzt verhalten. Es bestehen also in diesem Fall charakteristische Unterschiede zwischen U_x- und U_{null}-Schwelle. Auch die Ergebnisse in Abb. 9 sprechen dafür, daß die U_{null}-Schwelle bessere Auskunft über die tatsächlichen Empfindlichkeitsverhältnisse in der Netzhaut gibt als die U_x-Schwelle. Für die U_{null}-Schwelle ist bei Adaptation von Dunkelheit auf helles Umfeld zu Beginn der Helladaptation die Empfindlichkeit der Netzhaut etwas höher als bei

voller Adaptation auf die hohe Leuchtdichte. Dies leuchtet ein, da vermutlich die bei der Dunkeladaptation in der Netzhaut gespeicherten lichtempfindlichen Sehstoffe durch die Belichtung erst allmählich zerstört werden. Ähnliche und ausführlichere Aussagen über die Helladaptation stammen von LOHMANN (1907) und BAKER (1955), die "absolute Schwellen" bestimmten und damit ebenfalls die allmähliche Abnahme der Netzhautempfindlichkeit bei Helladaptation nachweisen konnten. Im täglichen Leben wird jedoch das Sehvermögen zumeist wie bei der U_x-Schwellenbestimmung beansprucht, für die gilt, daß die höchste Unterschiedsempfindlichkeit immer nur dann besteht, wenn auf die jeweilige Umfeldleuchtdichte voll adaptiert worden ist.

Zusammenfassung

Das Ziel der in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen war, einige variable Faktoren, nämlich Pupillenweite und Umfeldleuchtdichte, in ihrem Einfluß auf die Gestalt der Adaptationskurven kennenzulernen. Unter verschiedenen Versuchsbedingungen wurde sowohl der Zeitablauf der Adaptation als auch die Empfindlichkeitsverteilung in der Netzhaut bei verschiedenen gleichbleibenden Adaptationszuständen untersucht.

Der Einfluß der Pupillenweite auf das Ergebnis der Lichtsinnprüfung ist nicht so groß, wie den Öffnungsverhältnissen der Pupille entsprechen würde. Die vorhandenen Abweichungen von dieser Proportionalitätsbeziehung lassen sich nicht allein mit dem Stiles-Crawford-Effekt erklären, sondern machen es wahrscheinlich, daß die mit Erweiterung der Pupille einhergehende schlechtere Abbildungsleistung der brechenden Medien eine erhebliche Rolle spielt. Eine Berechnung in Troland ist zwar für die Charakterisierung eines bestimmten Adaptationszustandes der Netzhaut aufschlußreicher als die Angabe allein der Umfeldleuchtdichte, jedoch versagt diese Einheit weitgehend in Bezug auf Schwellenleuchtdichten klei-

ner Prüfmarken. Immerhin folgen wenigstens die bei enger Pupille gewonnenen Versuchsergebnisse der Tendenz der berechneten Trolandwerte. Bei der Auswertung der Kurven war zu berücksichtigen, daß bei Änderung der Pupillenweite meistens auch eine Änderung des Adaptationszustandes stattfindet.

Die Wirkung der Umfeldleuchtdichte auf die Bestimmung der Schwellenkurven konnte durch den Vergleich der Ergebnisse zweier Prüfmethoden untersucht werden. Die für diesen Vergleich gebrauchte zweite Methode unterschied sich von der üblichen Prüfweise dadurch, daß die Prüfmarke stets vor dunklem Hintergrund erschien. Es zeigte sich, daß sowohl die Höhenlage als auch die Form der Kurven sich ändert, wenn der Einfluß der Umfeldleuchtdichte auf die Schwellenbestimmung fortfällt. Aus den Versuchsergebnissen konnte gefolgert werden, daß die üblichen Adaptationsprüfungen bei verschiedenen Adaptationszuständen größere Unterschiede in der Empfindlichkeit der Netzhaut vortäuschen als tatsächlich bestehen. Außerdem sprechen die Befunde dafür, daß die Ansprechbarkeit des Dämmerungsapparates bei Adaptation auf wesentlich höhere Leuchtdichten einsetzt als bisher angenommen wurde.

Außerhalb der speziellen Fragestellung des Themas wurde der Ablauf der peripheren Adaptation nach Herabsetzung der Umfeldleuchtdichte im Zusammenhang mit zwei Arbeiten besprochen, die von CRAWFORD und HATTWICK veröffentlicht worden waren. Unsere Versuchsergebnisse sind sowohl denen CRAWFORDs als auch denen HATTWICKs vergleichbar.
Es konnte gezeigt werden, daß der zwischen diesen Arbeiten angenommene Gegensatz ein scheinbarer ist, der auf einer unterschiedlichen Darstellungsweise beruht.

Literatur

1.) AULHORN: Untersuchungen über das Wesen des Grenzkontrastes.
Ber. über die 60. Zus.kft. der DOG, Heidelberg 1956

2.) BAHR: Wirkung peripherer Strahlen bei Lichtsinnprüfung.
Nord.Med. (Stockh.) (1942), 356

3.) BAHR: On the Effect of Peripheral Rays in Testing of Light Sense, a Study on the Importance of the Pupil Area.
Acta Ophthalm. (Køben.) 19 (1941), 114

4.) BAKER: Some Direct Comparisons between Light and Dark Adaptation.
J.O.S.A. 45 (1955), 839

5.) BEST: Die Helligkeitsminderung bei Lichteinfall durch peripheres Pupillengebiet. (Richtungseffekt von Stiles und Crawford).
Zschr.f.ophthalm.Optik 31 (1943), 65

6.) BROWN: Effect of different preadapting luminances on the resolution of visual detail during dark adaptation.
J.O.S.A. 44 (1954), 48

7.) BUNGART: Adaptationsprüfung am Halbkugelperimeter. 63. Zus.kft. der DOG, 1960

8.) CRAWFORD: The Change of Visual Sensitivity with Time. Proc.Roy.Soc.Lond.,Ser.B, 123 (1937), 69

9.) CRAWFORD: The luminous efficiency of light entering the eye pupil at different points and its relation to brightness threshold measurements. Proc.Roy.Soc.Lond.,Ser.B, 124 (1937), 81

10.) HARMS: Die Adaptationsprüfung bei gleichbleibender Lichtempfindlichkeit des Auges. 55. Zus.kft. der DOG, 1949, 291

11.) HARTINGER: Pupillenweiten. Zschr.f.ophthalm.Optik 25 (1937),1

12.) HATTWICK: Dark Adaptation to intermediate levels and to complete darkness. J.O.S.A. 44 (1954), 223

13.) HECHT, HAIG und WALD: The dark adaptation of retinal fields of different size and location. J.gen.Physiol. 19 (1935), 231

14) HECHT, SELIG, HAIG, CHASE: The influence of light adaptation on subsequent dark adaptation of the eye. J. gen. Physiol. 20 (1937), 831

15.) HECKMANN: Vergleichende Adaptationsuntersuchungen bei gleichbleibender und zunehmender Lichtempfindlichkeit des Auges.
55. Zus.kft. der DOG, 1949, 195

16.) KOHLRAUSCH: Handb. d. norm. u. path.Physiol. von Bethe-Bergmann, Photoreceptoren I
Jul.Springer, Berlin 1929

17.) LOHMANN: Über Helladaptation.
Zschr.f.Psychol. u. Phys. d. Sinnesorg., 41 (1907), 290

18.) MÜLLER: Über den Einfluß verschieden langer Vorbelichtung auf die Dunkeladaptation und auf die Fehlergröße der Schwellenreizbestimmung während der Dunkelanpassung.
Graefes Archiv 125 (1930), 624

19.) PETERSEN: Die Pupillographie und das Pupillogramm.
Acta physiol.scand. 37 (1956), Suppl. 125, 1

20.) SEITZ: Die Altersabhängigkeit der Pupillenerweiterung bei Dunkeladaptation.
Klin.Mb.f.Aug. 131 (1957), 48

21.) SLOAN: Instruments and technics for the clinical testing of light sense III.
Arch.of Ophthalm. 22, (1939), 233

22.) SLOAN: Rate of dark adaptation and regional threshold gradient of the dark adapted eye: physiologic and clinical studies. Amer.J.Ophthalm 30 (1947), 705

23.) STILES: The directional sensitivity of the retina and the spectral sensitivity of the rods and cones. Proc.Roy.Soc.Lond.,Ser.B, 127 (1939), 64

24.) STILES und CRAWFORD: The luminous efficiency of rays entering the eye pupil at Different points. Proc.Roy.Soc.Lond.,Ser.B, 112 (1933), 428

25.) TEUCHER: Pupillengröße und Hellempfindung im Tages- und Dämmerungssehen. Zschr.f.ophthalm.Optik 30 (1942), 161

26.) WOLF und ZIGLER: Location of the break in the dark adaptation curve in relation to pre-exposure brightness and pre-exposure time. J.O.S.A. 44 (1954), 875

27.) WOLF und ZIGLER: Dark adaptation level and test-field size. J.O.S.A. 40 (1950), 211

28.) WOLF, ZIGLER, COWEN-SOLOMONS: Variability of dark adaptation. J.O.S.A. 50 (1960), 961

L e b e n s l a u f

Am 22. Juni 1933 wurde ich, Ernst-Martin Meyner, in Altenburg/Thür. als Sohn des praktischen Arztes Dr. Ernst Meyner und seiner Frau Margarete geb. Schmutzler geboren. In Glauchau besuchte ich die Volks- und Oberschule, an der ich 1951 die Reifeprüfung ablegte. Anschließend war ich im Bauhandwerk tätig bis zur Facharbeiterprüfung als Zimmerer.
1953 begann ich das Studium der Medizin in Leipzig, setzte es 1958 in Tübingen fort und bestand dort im Jahre 1960 das medizinische Staatsexamen. An der Tübinger Universitäts-Augenklinik befaßte ich mich mit der Ausarbeitung der vorliegenden Dissertation.